

**ОАО Киевский научно-исследовательский и проектно конструкторский институт
«Энергопроект»**

Шевелев Д. В. Сапожников Ю.А.

**Анализ защиты первого контура РУ ВВЭР-440 от холодной переопрессовки с
применением кода RELAP 5 mod 3.2.**

08-12 Апреля

Киев – 2002

Введение

Существующая схема защиты первого контура от превышения давления на энергоблоках № 1 и 2 Ровенской АЭС включает в себя два предохранительных клапана, присоединенных к КД, которые не удовлетворяют требованиям нормативно-технической документации, действующей на Украине, и имеют ряд существенных недостатков, основными из которых являются:

- не обеспечивается надежная работа на двухфазной среде, воде, при чередовании сред, что приводит к возможности заклинивания в открытом состоянии в случае переходного процесса, приводящего к открытию клапанов;
- конструкцией клапана не предусмотрена возможность контроля положения главного и импульсных клапанов (открыто - закрыто), что приводит к невозможности достоверного определения положения главных клапанов;
- не обеспечивается возможность принудительного дистанционного открытия, что приводит к невозможности реализации процедуры "feed and bleed";
- не обеспечивается защита от переопрессовки оборудования первого контура в холодном состоянии.

Для устранения вышеперечисленных недостатков системы защиты первого контура от превышения давления необходимо произвести замену ИПУ КД устаревшей конструкции на устройства новой конструкции удовлетворяющие всем условиям безопасной эксплуатации и требованиям действующей НТД по безопасности. В соответствии с требованиями нормативно-технической документации, действующей в Украине, изменения в системах, важных для безопасности, должны быть обоснованы специальными анализами, подтверждающими безопасность эксплуатации АЭС. В этой связи возникает необходимость проведения ряда теплогидравлических и прочностных анализов, причем выполняются они в два этапа:

1. Анализ, проводимый с целью обоснования требований к новым ИПУ КД (режимы работы, времена открытия/закрытия, пропускная способность и т. д.). То есть в данном анализе рассматривается некоторое абстрактное устройство, которое включает в себя все существующие характеристики «старого» ИПУ КД и все необходимые особенности конструкции, которыми должна обладать «новая» система защиты первого контура от превышения давления.
2. Анализ безопасности АЭС после выбора конструкции нового ИПУ КД, с учетом всех особенностей и предложенных технических решений разработчиками нового устройства.

В данной работе представлены результаты тепло-гидравлических анализов, выполненных на первом этапе с целью обоснования требований к новым ИПУ КД для выполнения функции защиты корпуса реактора и оборудования первого контура от переопрессовки в состоянии «холодный останов».

В отличие от анализов переходных процессов при работе РУ на мощности, которых было проделано достаточно большое количество, работ по расчетам переходных процессов было проведено ограниченное количество и такие задачи, как правило, решались качественной оценкой без получения конкретных значений параметров РУ. В качестве теплогидравлического кода для проведения данного спектра анализов был использован код RELAP5 mod 3.2, который показал достаточно корректные результаты при применении традиционных подходов к моделированию оборудования РУ.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

«Холодное» состояние РУ характеризуется следующими параметрами:

- реактор подкритичен;
- сочетание давления и температуры металла корпуса реактора удовлетворяют принятому критерию сопротивления хрупкому разрушению (давление в первом контуре не должно превышать 50 кгс/см^2 (4,9 МПа) при средней температуре теплоносителя менее 130°C);
- концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура, обеспечивающая подкритичность реактора, не менее 16 г/кг
- открыты все ГЗЗ;
- кассеты АРК опущены на жесткие упоры и снято питание с приводов.

Отвод тепла от РУ обеспечивается работой систем второго контура.

Отвод остаточных тепловыделений от активной зоны реактора осуществляется тремя ГЦН. Соответствующие парогенераторы со стороны второго контура и паропроводы заполнены водой. Циркуляция воды второго контура осуществляется насосами расхолаживания по замкнутому контуру: парогенераторы – паропроводы – редуцирующее устройство расхолаживания – технологический конденсатор – насос расхолаживания - парогенератор.

Анализы исходных событий переходных процессов для состояния РУ «холодный» останов выполняются с целью разработки технических требований к ИПУ КД при выполнении функций защиты первого контура от превышения давления в «холодном» состоянии.

В соответствии с принятым критерием по сопротивлению хрупкому разрушению, давление в первом контуре не должно превышать 50 кгс/см^2 (4,9 МПа) при средней температуре металла корпуса реактора $130 \text{ }^\circ\text{C}$.

Анализ переходных процессов выполнялся при следующих начальных условиях реакторной установки:

- реакторная установка находится на 0 % нейтронной мощности (тепловая мощность реактора, определяемая остаточными тепловыделениями, соответствует 1,02 % номинальной мощности);
- алгоритм системы защиты и управления реактора осуществляется в соответствии с проектными уставками и блокировками для состояния РУ "холодный останов";
- предусматривается невмешательство оперативного персонала в течение всего расчетного времени;
- открыты все ГЗЗ;
- создана азотная подушка в КД;
- принимается, что в работе находятся три ГЦН, с целью достижения минимальной начальной температуры теплоносителя в первом контуре (количество работающих ГЦН определяется так же особенностями трехпетлевой модели РУ);
- отвод остаточных тепловыделений от активной зоны реактора осуществляется через три парогенератора (остальные парогенераторы не заполнены);
- учитывается работа только ИПУ КД, для максимального нагружения последних в расчетах.

В качестве исходных данных для выполнения анализов выбраны параметры по РУ перед окончательным снижением давления в первом контуре до $3\text{-}5 \text{ кгс/см}^2$ (0,29-0,49 МПа). В таблице 1 приведены основные характеристики РУ в состоянии «холодный» останов.

Таблица 1

Наименование параметра	Величина
1 Тепловая мощность реактора (остаточные тепловыделения активной зоны), МВт	1,02%
2 Давление в первом контуре, кгс/см^2 (МПа)	20(1,9)
3 Средняя температура теплоносителя в первом контуре, $^\circ\text{C}$ (К)	67,7
4 Уровень в КД (от днища), м	8,1
5 Давление в парогенераторе, кгс/см^2 (МПа)	3,5(0,34)
6 Расход теплоносителя со стороны второго контура, $\text{м}^3/\text{ч}$	250

Поставлена задача: выполнить анализ по обоснованию безопасности с целью определения проектных характеристик новой системы защиты от превышения давления.

С целью обоснования дополнительной функции ИПУ КД, для защиты первого контура от переопрессовки в состоянии холодного останова, необходимо обеспечить открытие ИПУ КД при давлении в первом контуре 50 кгс/см^2 (4,9 МПа). Проектная кривая охрупчивания представлена на рис. 1.

Характеристики ИПУ КД и перечень защит и блокировок системы защиты первого контура от превышения давления представлены в таблицах 2,3.

Таблица 2 Характеристика оборудования

Наименование параметров	Величина
Давление открытия/закрытия предохранительных устройств КД, кгс/см ² (МПа) (для состояния РУ "холодный останов"): <ul style="list-style-type: none"> • контрольный ИПУ КД • рабочий ИПУ КД 	50,0 (4,904)/45,3(4,44) 50,05 (4,956)/46,3(4,54)
Пропускная способность ИПУ КД по пару (при расчетном давлении и температуре), т/ч	115
Расчетное давление, кгс/см ² (МПа)	154 (15,2)
Расчетная температура, °С (К)	345
Количество ИПУ КД	2
Гидроемкость: <ul style="list-style-type: none"> • полный объем, м³ • объем воды, м³ • объем азота, м³ • температура среды, °С (К) • давление, кгс/см² (МПа) • количество • концентрация борной кислоты, г/кг 	70 40-50 30-20 60 (333) 55-60 (5,4-5,9) 4 16
Насос расхолаживания через технологический конденсатор: <ul style="list-style-type: none"> • номинальная подача, м³/ч • номинальный напор, м • количество 	500 70 3
Технологический конденсатор: <ul style="list-style-type: none"> • поверхность теплообмена, м² • расход охлаждаемой среды, м³/ч • расход технической воды, м³/ч • количество 	420 500 до 1200 2

Таблица 3 Технологические защиты и блокировки на срабатывание ИПУ КД

Блокировки по ИПУ КД	Защитное действие
Давление в паровой части КД 50,0 кгс/см ² (4,904 МПа) и более	Открытие контрольного ИПУ КД
Давление в паровой части КД 45,3 кгс/см ² (4,44 МПа) и более	Закрытие контрольного ИПУ КД
Давление в паровой части КД менее 50,05 кгс/см ² (4,956 МПа)	Открытие рабочего ИПУ КД
Давление в паровой части КД менее 46,3 кгс/см ² (4,54 МПа)	Закрытие рабочего ИПУ КД
Давление в баке-барботере более 14,5 кгс/см ² (1,42 МПа)	Разрыв предохранительной мембраны

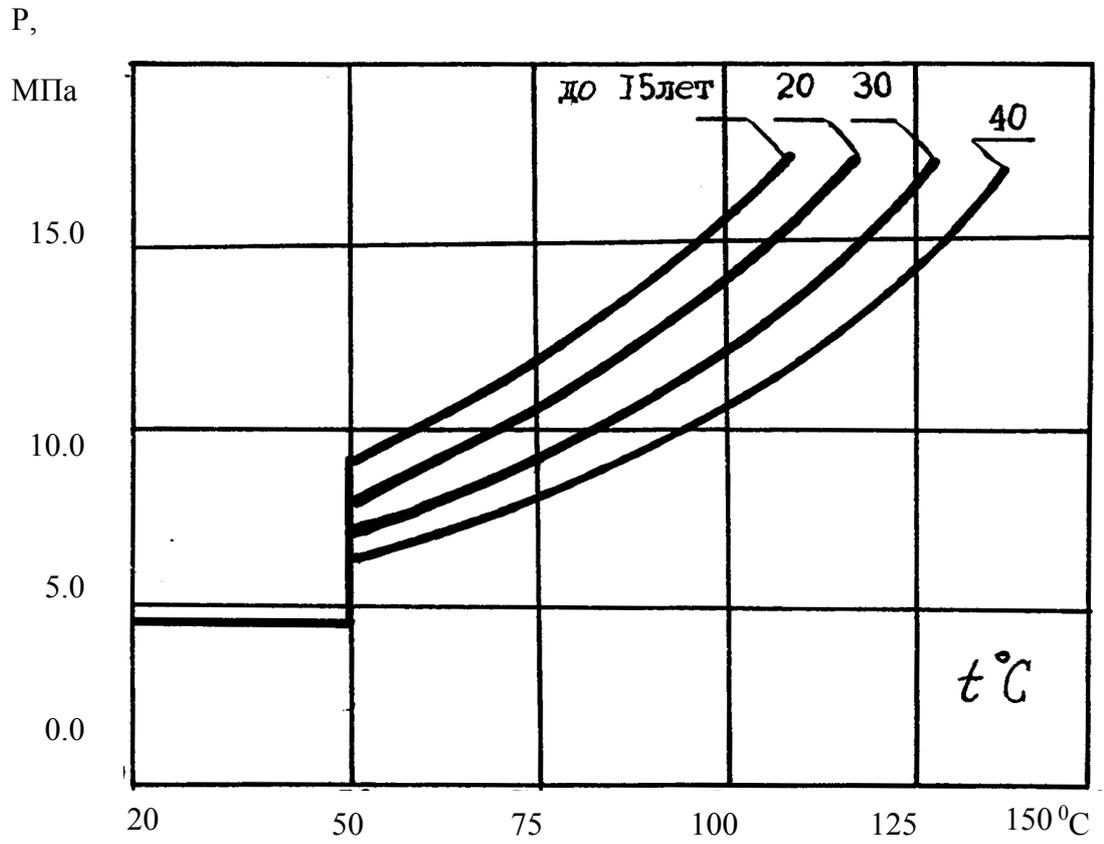


Рисунок 1 Допустимые параметры первого контура при разогреве и охлаждении РУ (кривая «охрупчивания»)

ВЫБОР АНАЛИЗИРУЕМЫХ ИСХОДНЫХ СОБЫТИЙ

При выборе исходных событий учитывались дополнительные функции для ИПУ КД, а именно: защита первого контура от превышения давления в холодном состоянии.

Для режима РУ в состоянии «холодный останов» рассмотрены режимы, связанные с:

- уменьшением теплоотвода со стороны второго контура – потеря охлаждения технологического конденсатора;
- введением дополнительной энергии – непредусмотренное (ложное) включение ТЭН КД;
- увеличением массы теплоносителя первого контура:
 - непреднамеренное срабатывание гидроемкостей САОЗ;
 - непредусмотренное (ложное) включение одного из насосов САОЗ ВД;
 - непредусмотренное (ложное) включение резервного подпиточного насоса.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА КОНСЕРВАТИВНОГО ПОДХОДА

Анализ аварии, в соответствии с принципами консервативного подхода, проводится с учетом наихудшей комбинации следующих параметров реакторной установки:

- во время исходного события реакторная установка находится на 0 % нейтронной мощности (тепловая мощность реактора, определяемая остаточными тепловыделениями, соответствует 1,02 % номинальной мощности);
- температура теплоносителя на входе в реактор 67,7 °С (340,7 К);
- давление в первом контуре 20 кгс/см² (1,9 МПа).

Данные значения параметров выбраны из условий работы оборудования при состоянии - РУ "холодный останов".

При выполнении анализов для состояния РУ «холодный останов» единичный отказ в системах безопасности РУ не применялся ввиду гипотетичности аварии, а также ограниченного количества задействованных систем безопасности.

АНАЛИЗ АВАРИЙ

В результате проведения анализов были получены данные по переходным процессам представленные в сводной таблице 4.

Таблица 4 Сводная таблица параметров среды протекающей через ИПУ КД при анализе аварий в состоянии РУ «холодный» останов

Исходное событие	Мах расход среды через ИПУ КД, кг/с	Сбрасываемая среда	Мах/min плотность, кг/м ³	Мах скорость среды, м/с	Кол-во циклов
Потеря теплоотвода по второму контуру (потеря охлаждения технологического конденсатора)	41	Азот, насыщенный пар и вода, объемное влагосодержание – до 92%	987/45	31	5
Непредусмотренное (ложное) включение всех групп ТЭН КД	44	Азот, насыщенный пар и вода, объемное влагосодержание – до 81%	987/45	27	1
Непредусмотренное (ложное) срабатывание двух гидроемкостей САОЗ	56	Азот, насыщенный пар и вода, объемное влагосодержание – до 100%	987/45	57	около 120 срабатываний за время расчета
Непредусмотренное (ложное) включение одного из насосов САОЗ ВД	105	Азот, насыщенный пар и вода, объемное влагосодержание – до 99%	987/50	44	около 40 срабатываний за время расчета

Исходное событие	Мах расход среды через ИПУ КД, кг/с	Сбрасываемая среда	Мах/min плотность, кг/м ³	Мах скорость среды, м/с	Кол-во циклов
Непредусмотренное (ложное) включение резервного подпиточного насоса	97	Азот, насыщенный пар и вода, объемное влагосодержание – до 100%	981/45	51	30

Как видно из результатов, представленных в таблице 4, в случае невмешательства оперативно-го персонала в ход протекания процесса, наиболее интенсивной является работа ИПУ при аварии с непредусмотренным срабатыванием всех гидроемкостей САОЗ. Остановимся на этой аварии более подробно.

Анализ работы ИПУ КД при аварии с ложным срабатыванием двух гидроемкостей САОЗ

Анализ аварии проведен с использованием теплогидравлического кода RELAP5 mod 3.2. Хронологическая последовательность развития процесса для данного исходного события аварии представлена ниже (Таблица 5). Графики изменения параметров РУ как функция от времени представлены на рис. 2-11.

Таблица 5- Хронологическая последовательность событий

Событие	Момент времени, с
Непреднамеренное открытие арматуры на трубопроводах связи ГЕ САОЗ – реактор. Обесточение секции питания собственных нужд блока. Отключение ГЦН	0
Истечение борного раствора из ГЕ САОЗ	0-130
Первое открытие ИПУ КД, рост давления и температуры в барботажном баке, падение давления первого контура, температуры в КД	5
Разрыв предохранительной мембраны в барботажном баке	12
Запуск дизель-генераторов, введение в действие программы ступенчатого пуска. Запуск насосов расхолаживания через технологический конденсатор	18
Запуск насосов техводы ответственных потребителей	33
Повторное истечение среды из ГЕ САОЗ	220-245, 310-325, 520-540, 2770-2790, 4740-4780, 11100-11140
Заполнение КД	4680
Конец расчета	15000

В исходном состоянии энергоблок находится на нулевом уровне мощности. В КД создана азотная подушка. Три парогенератора, используемые для расхолаживания, заполнены водой.

Происходит ложное открытие арматуры на трубопроводах подачи борного раствора из двух гидроемкостей САОЗ в реактор. Борированная вода давлением азота 60 кгс/см^2 ($5,89 \text{ МПа}$) вытесняется в реактор с давлением первого контура 20 кгс/см^2 ($1,96 \text{ МПа}$). Возрастает уровень в КД.

Происходит обесточивание секции питания собственных нужд. Отключаются ГЦН. Производится разворот ДГ и выполнение программы ступенчатого пуска в режиме планового нагружения. Истечение среды из ГЕ САОЗ продолжается до момента выравнивания давления.

При повышении давления первого контура до $50,0 \text{ кгс/см}^2$ ($4,9 \text{ МПа}$) открывается ИПУ КД. Происходит истечение теплоносителя первого контура и азота через ИПУ КД и трубопровод сброса пара в бак-барботер. По причине того, что азот, находящийся в КД, является неконденсируемой средой, происходит резкий рост давления в барботажном баке и разрыв предохранительной мембраны бака-барботера с выбросом среды в помещение бокса ПГ. Падение давления в первом контуре вызывает повторное истечение среды из ГЕ САОЗ.

В первом контуре устанавливается естественная циркуляция. Ухудшение теплоотвода от активной зоны вызывает дальнейший рост давления и температуры в первом контуре и уровня в КД, что вызывает многократное открытие ИПУ КД и последующее истечение среды из ГЕ САОЗ.

Периодическое открытие ИПУ КД позволяет поддерживать давление первого контура на уровне не выше уставки срабатывания ИПУ КД - менее 50 кгс/см^2 ($4,9 \text{ МПа}$).

Уровень в КД постепенно повышается и КД заполняется полностью.

Действия персонала заключаются в выяснении причин открытия арматуры на трубопроводе от ГЕ САОЗ, контроле параметров теплоносителя первого контура и теплоотвода через второй контур.

Расчет прекращен на 15000-й секунде протекания аварии.

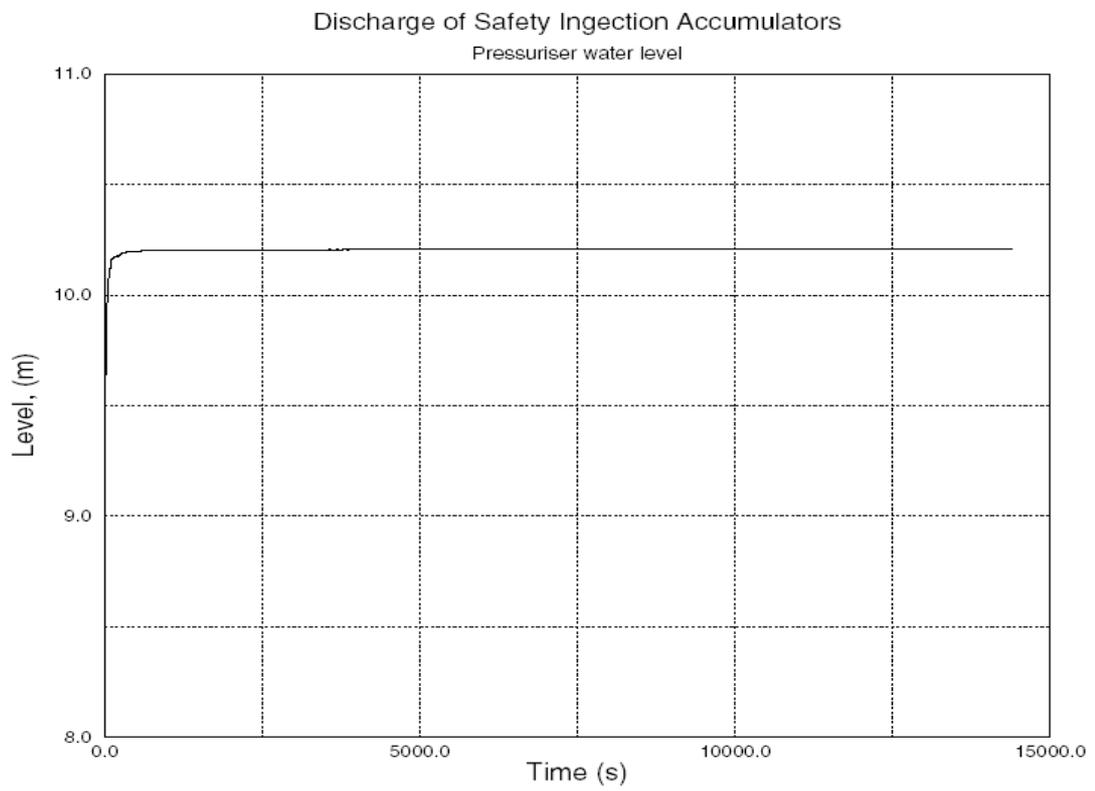


Рисунок 2 – Зависимость уровня в КД от времени

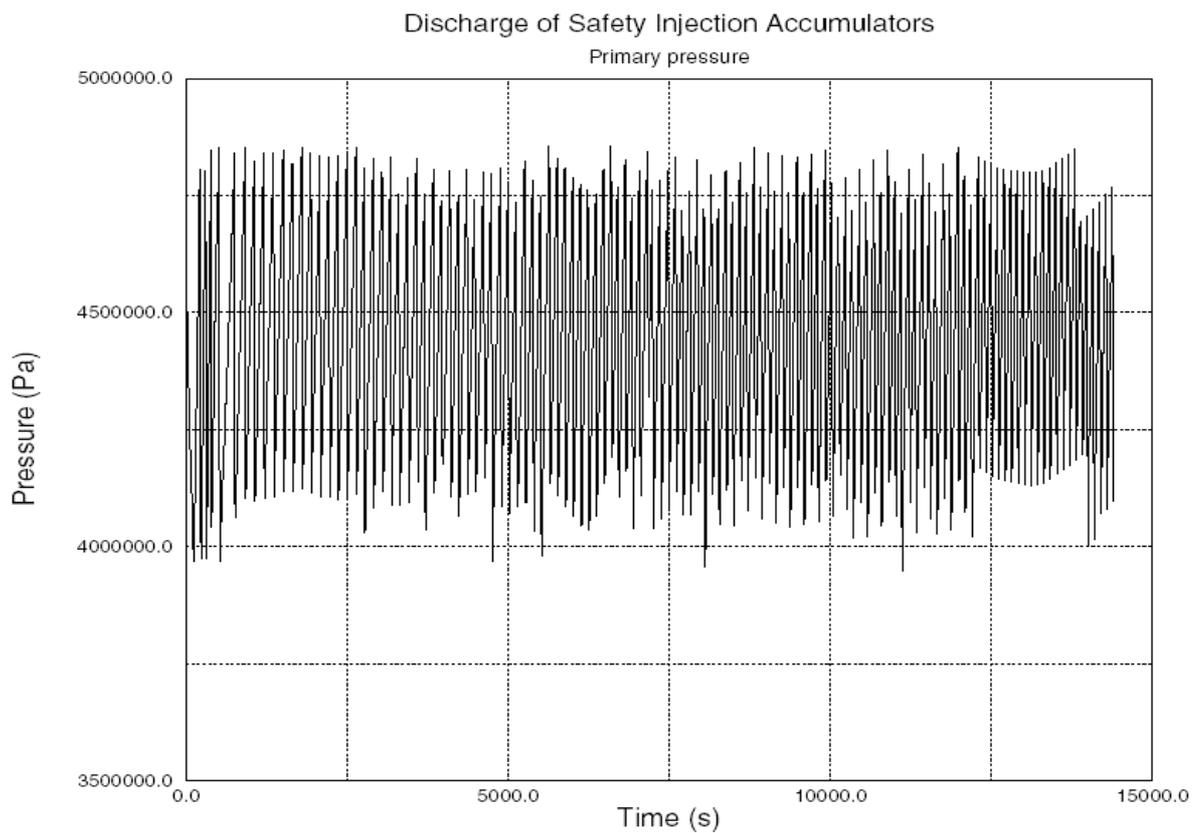


Рисунок 3– Зависимость давления в первом контуре от времени

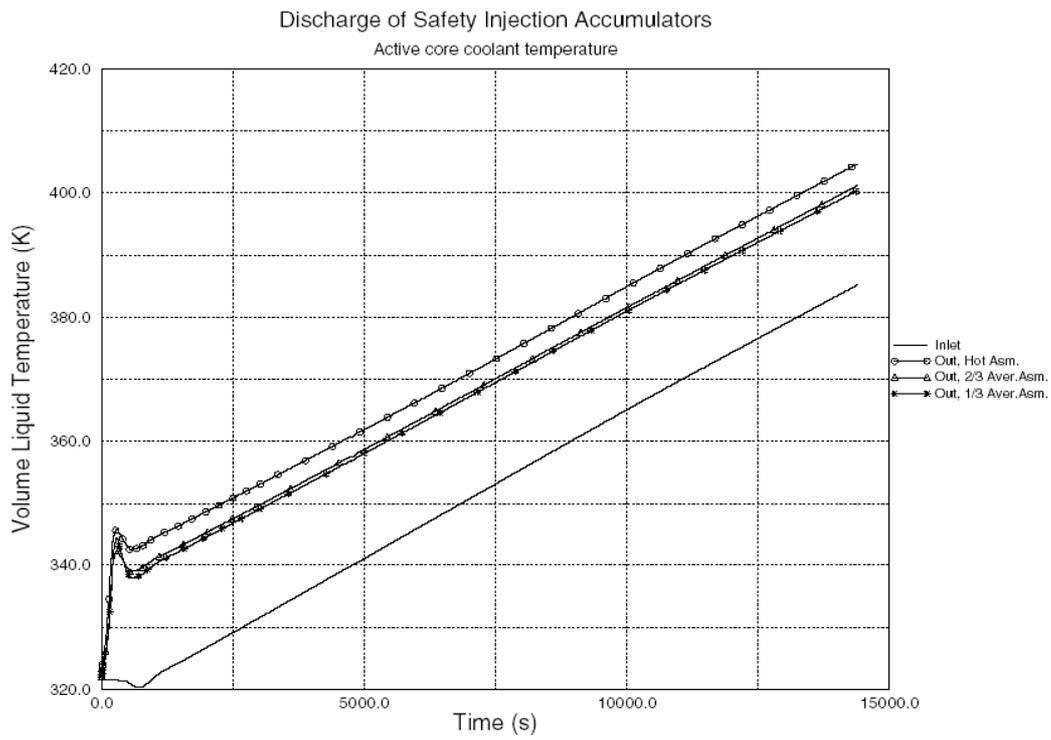


Рисунок 4 - Зависимость температуры теплоносителя в реакторе от времени

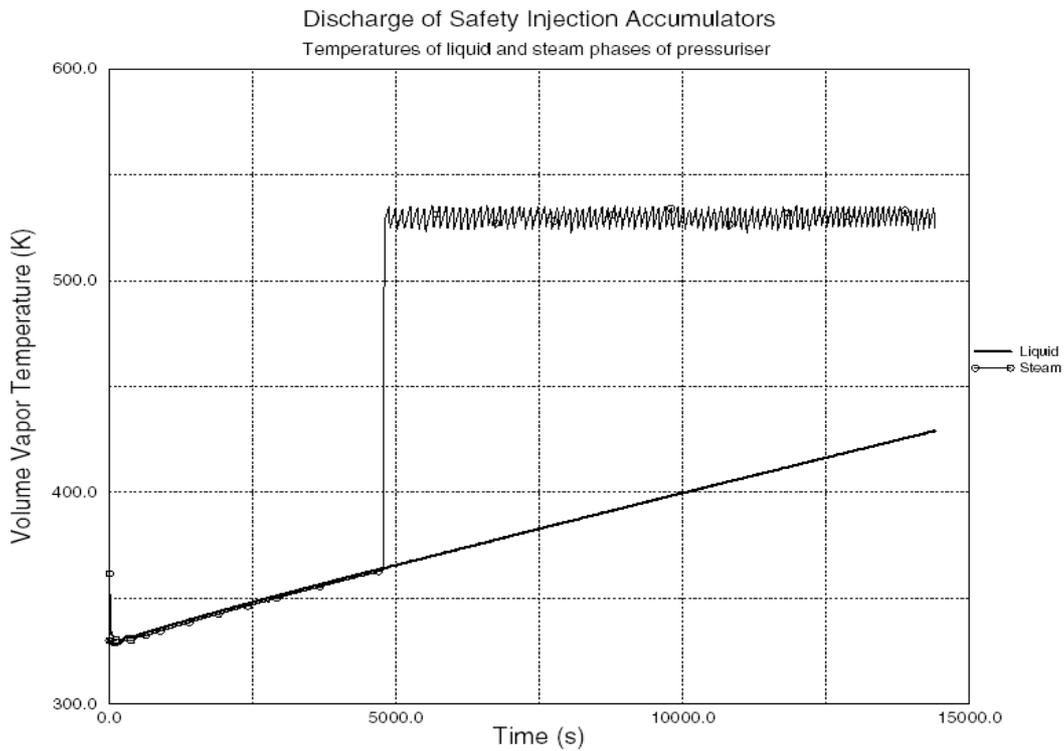


Рисунок 5 - Зависимость температуры жидкости и пара в КД от времени

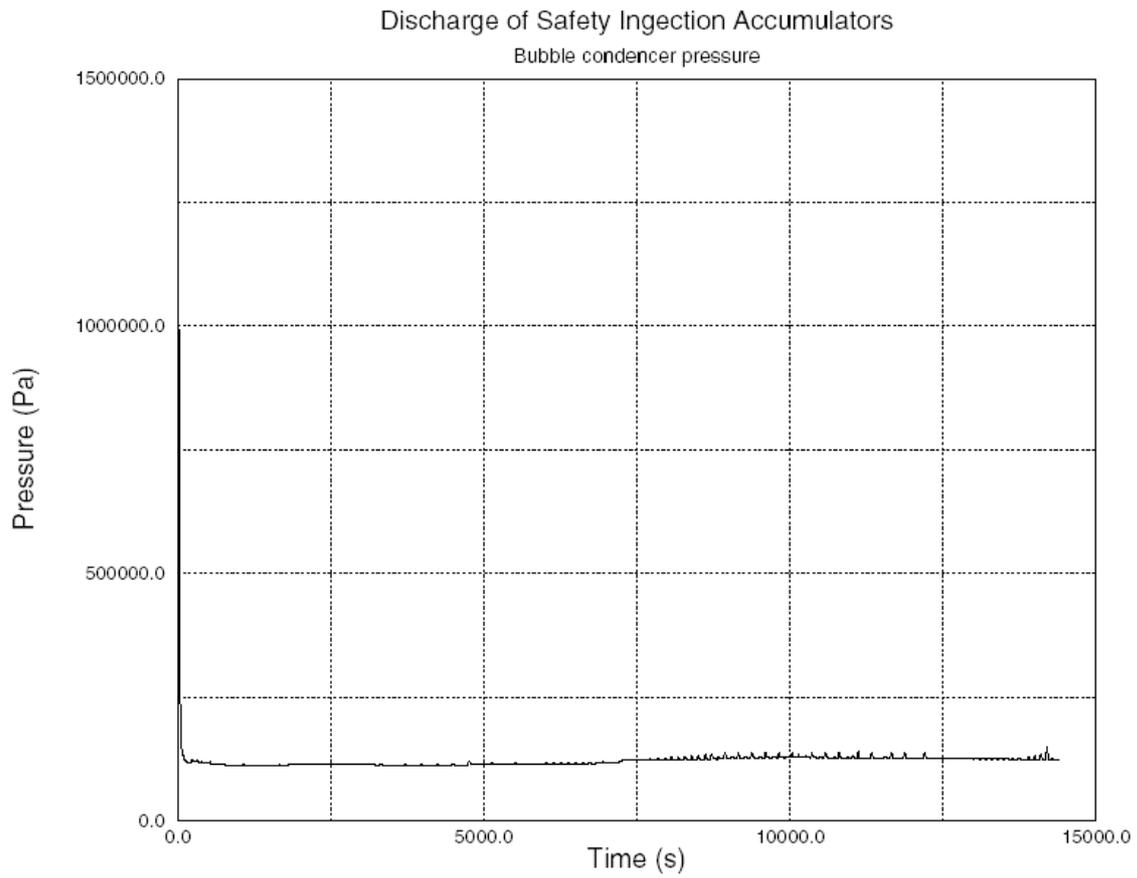


Рисунок 6– Зависимость давления в барботажном баке от времени

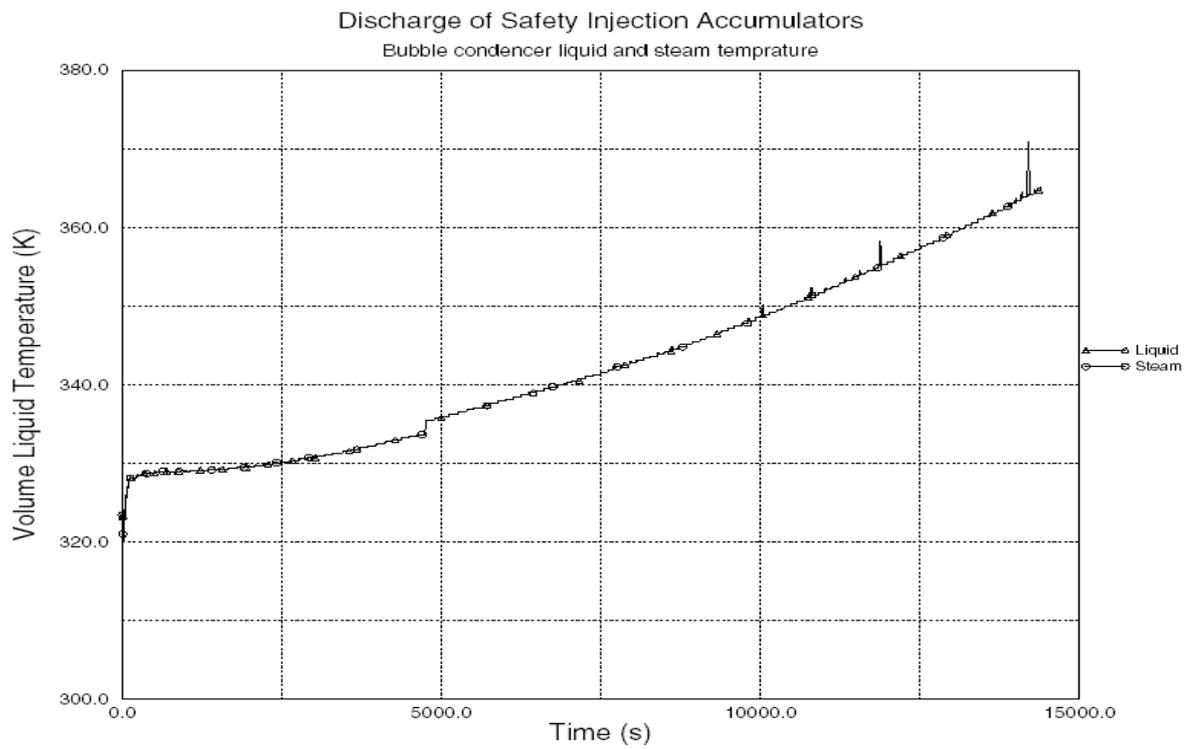


Рисунок 7 – Зависимость температуры жидкости и пара в барботажном баке от времени

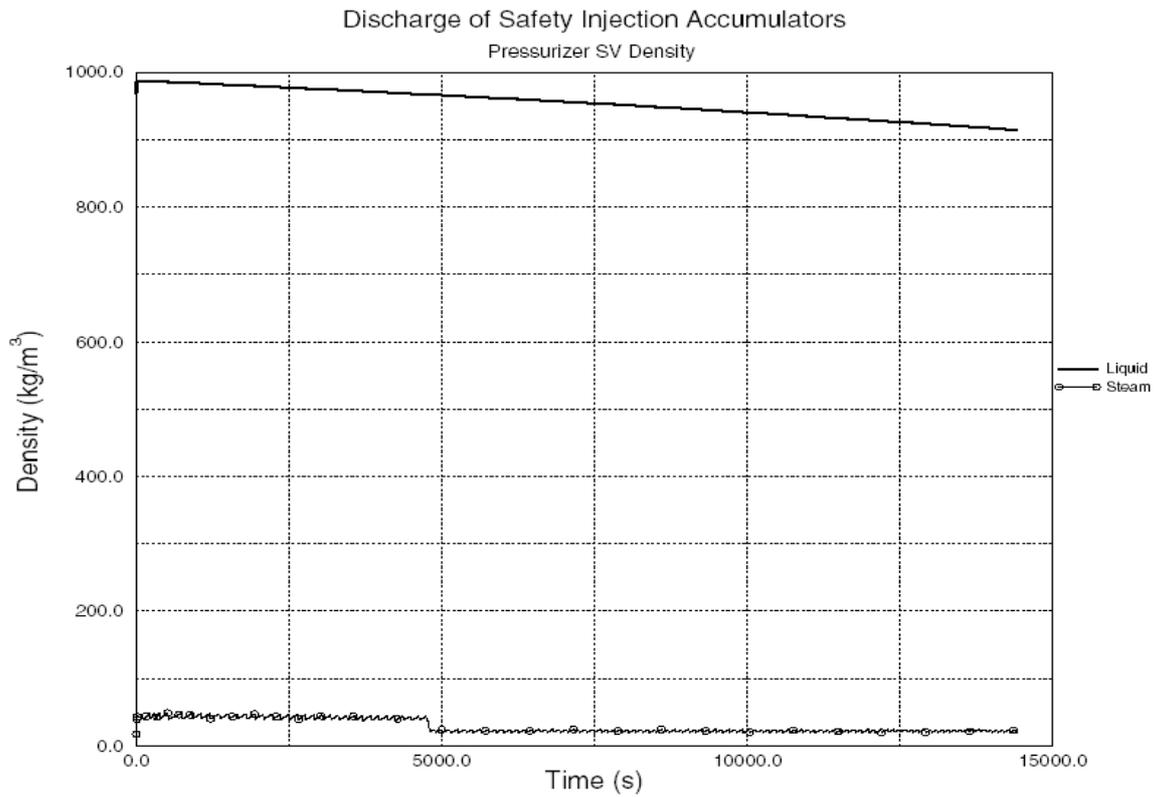


Рисунок 8 - Зависимость плотности среды, протекающей через ИПУ КД, от времени

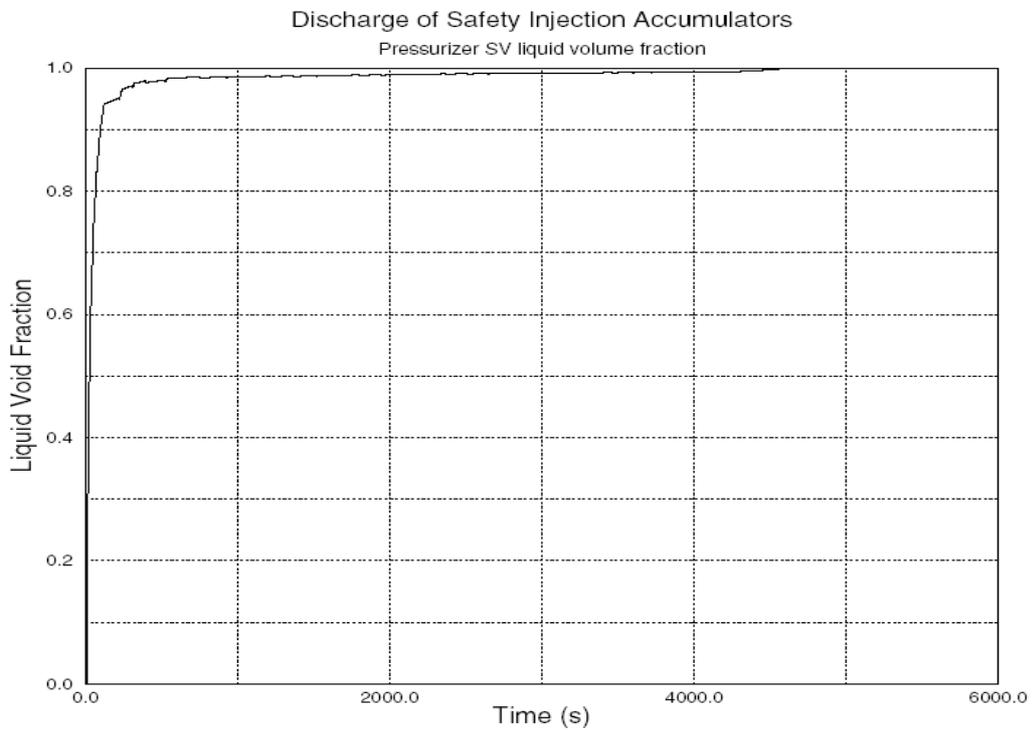


Рисунок 9 – Зависимость объемного влагосодержания среды, протекающей через ИПУ КД, от времени

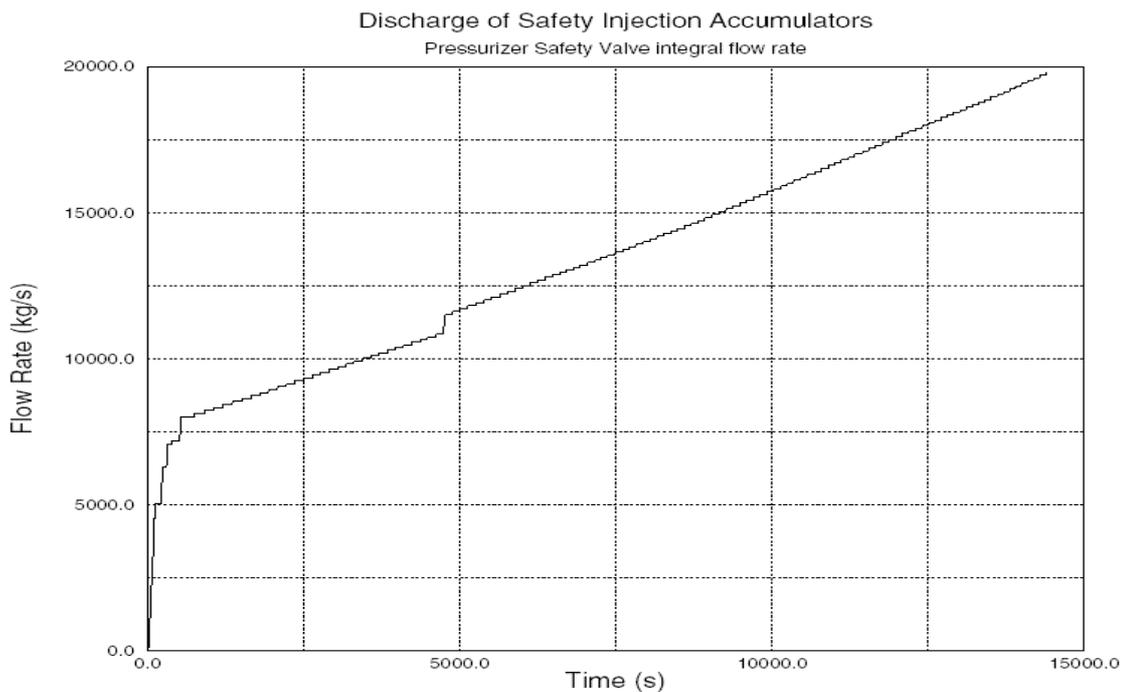


Рисунок 10 – Зависимость расхода среды через ИПУ КД от времени

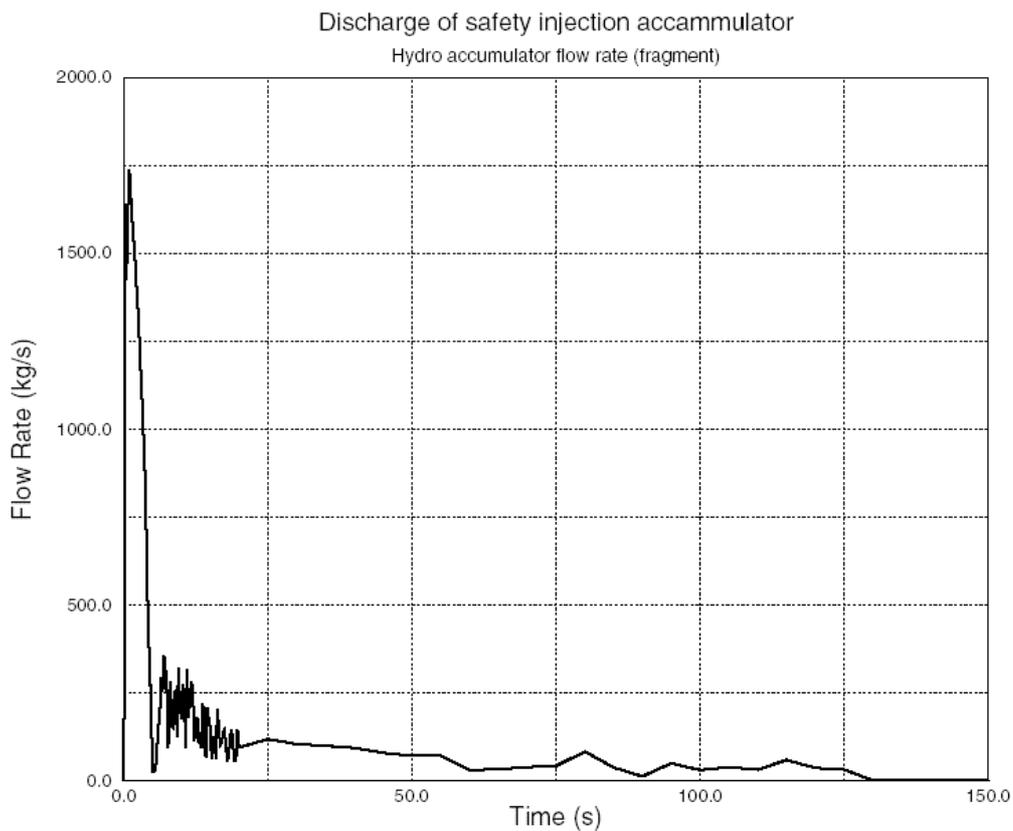


Рисунок 11 - Зависимость расхода среды из гидроемкостей от времени (фрагмент)

Выводы

В рассмотренном режиме с ложным срабатыванием гидроемкостей САОЗ давление в первом контуре не превышает 50 кгс/см^2 (4,9 МПа) в соответствии с принятым критерием по сопротивлению хрупкому разрушению корпуса реактора.

В процессе аварии достигается уставка срабатывания ИПУ КД. В данном режиме параметры ИПУ КД должны соответствовать следующим требованиям:

- частота срабатывания – приблизительно каждые две минуты;
- интегральный расход среды через ИПУ к концу расчета составляет почти 20000 кг;
- состав среды – смесь воды и пара с влагосодержанием, близким к 100%;
- максимальная скорость пароводяной смеси – 57 м/с;
- плотность среды, протекающей через ИПУ КД, находится в пределах $900\text{-}1000 \text{ кг/м}^3$.

Данный режим является наиболее «критическим» с точки зрения нагрузок, расходов и частоты срабатывания ИПУ КД. Следовательно, данные по данному режиму должны быть использованы для обоснования конструкции ИПУ КД. Причем, как видно из частоты срабатывания ИПУ при работе на несжимаемой жидкости (воде), такой режим функционирования может привести к выходу из строя ИПУ КД даже при однократном возникновении данного режима. Для избежания подобных режимов необходимо предусмотреть меры, которые бы предохраняли само ИПУ КД от частого открытия.

Проведенный анализ показывает возможность применения теплогидравлического кода RELAP5 mod. 3.2 для проведения интегральных расчетов параметров РУ в состоянии «холодный останов». Полученные авторами результаты согласуются с качественными оценками и могут быть использованы как исходные данные для предъявления технических требований к конструкции ИПУ КД, а также для проведения расчетов трубопроводов ИПУ на прочность.

Анализ защиты первого контура РУ ВВЭР-440 от холодной переопрессовки с применением кода RELAP5 mod 3.2.

В докладе рассматриваются подходы при выполнении анализов безопасности, связанных с защитой первого контура от холодной переопрессовки, и методы, применяемые при этом. Для расчетного обоснования предложенных методик используется теплогидравлический код RELAP5 mod 3.2. В качестве исходных событий для проведения анализов приняты следующие события:

- с уменьшением теплоотвода со стороны второго контура – потеря охлаждения технологического конденсатора;
- с введением дополнительной энергии – непредусмотренное (ложное) включение ТЭН КД;
- с увеличением массы теплоносителя первого контура:
 - непреднамеренное срабатывание гидроемкостей CAOЗ;
 - непредусмотренное (ложное) включение одного из насосов CAOЗ ВД;
 - непредусмотренное (ложное) включение резервного подпиточного насоса.

На основе результатов, полученных с помощью теплогидравлического кода RELAP5 mod 3.2, приводятся рекомендации и требования к оборудованию РУ для обеспечения защиты первого контура от переопрессовки в холодном состоянии.

Yuriy Sapozhnykov

Analysis of NSSS WWER-440 Primary Circuit Protection against Cold Overpressure Using Computer Code RELAP5 Mod3.2

The approaches and methods of the safety analyses performance studied concerning primary circuit protection against cold overpressure. For the computational assessment of the suggested methodologies the thermohydraulic computer code RELAP5 Mod3.2 was applied. As the representative initiating events, the following cases were analyzed:

- Secondary heat removal reduction events: loss of the technological condenser;
- Additional energy insertion: inadvertent (spurious) PRZ heaters operation;
- Primary inventory increasing:
 - inadvertent (spurious) ECCS hydroaccumulators discharge;
 - inadvertent (spurious) start-up of one HPIS pump;
 - inadvertent (spurious) start-up of the spare make-up pump

On the basis of the results obtained, the recommendations and the requirements to the NSSS equipment are developed to provide primary system protection against cold overpressure.